

Agnieszka BANASZAK
Przemysław TABAKA
Justyna WTORKIEWICZ

ANALIZA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI RÓŻNYCH TYPÓW LUKSOMIERZY

STRESZCZENIE Podstawowym i najczęściej stosowanym miernikiem w fotometrii jest luksomierz. Aby mierzone natężenie oświetlenia odpowiadało wartości odniesienia, miernik ten musi spełniać szereg wymagań, do których zalicza się m.in. korekcję widmową oraz przestrzenną głowicy fotometrycznej luksomierza. W ostatnich latach na rynku można spotkać coraz więcej fotometrów, które z uwagi na niską cenę cieszą się dużym zainteresowaniem. Bardzo często ich koszt jednostkowy jest niższy od ceny wzorcowania. W artykule, na podstawie przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych, przeanalizowano wybrane właściwości metrologiczne powszechnie używanych typów luksomierzy podczas weryfikacji parametrów oświetlenia we wnętrzach. Pomiarom poddano zarówno mierniki o wysokiej, jak i o niższej dokładności. Wobec faktu, że do oświetlania wnętrz stosowane są źródła światła o różnych rozkładach widmowych emitowanego promieniowania, zarejestrowano wskazania poszczególnych luksomierzy przy oświetleniu ich powierzchni światłoczułych lampami wyladowczymi oraz źródłami LED. Uzyskane wartości odniesiono do pomiarów otrzymanych przy użyciu lampy żarowej o temperaturze barwowej $T_c = 2856$ K – źródle, którego promieniowanie wykorzystywane jest przy wzorcowaniu fotometrów. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono błędy względne oraz błędy kosinusowe luksomierzy, a także współczynniki (wskaźniki) korekcji barwy. Pomiaru uzupełniono rejestracją rozkładów widmowych źródeł światła wykorzystanych podczas pomiarów eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: luksomierz (fotometr), błąd kosinusowy, współczynnik (wskaźnik) korekcji barwowej, rozkład widmowy, wzorcowanie, błędy pomiaru, źródła światła

mgr inż. Agnieszka BANASZAK, mgr inż. Justyna WTORKIEWICZ

e-mail: [oum.lodz.jakosc; oum.lodz.w42]@gum.gov.pl

Okręgowy Urząd Miar w Łodzi, ul. G. Narutowicza 75, 90-132 Łódź

dr inż. Przemysław TABAKA

e-mail: przemyslaw.tabaka@wp.pl

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 268, 2015

1. WSTĘP

W warunkach niedostatecznego lub całkowitego braku oświetlenia dziennego zachodzi konieczność zastosowania oświetlenia sztucznego. Pracodawca zobowiązany jest do zapewnienia oświetlenia elektrycznego o parametrach zgodnych z wymaganiami Polskich Norm, w myśl rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. [1]. W tym samym rozporządzeniu znajduje się zapis nakładający na pracodawcę obowiązek przeprowadzania pomiarów i oceny parametrów natężenia oświetlenia.

Podstawową i w praktyce jedyną wielkością mierzoną podczas weryfikacji parametrów oświetlenia elektrycznego we wnętrzach jest natężenie oświetlenia, które mierzy się za pomocą luksomierza – przyrządu składającego się z głowicy pomiarowej oraz miernika prądu fotoelektrycznego współpracującego ze wzmacniaczem. Aby rejestrowane przez luksomierz natężenie oświetlenia odpowiadało wartości odniesienia, przyrząd ten musi spełniać szereg wymagań. Do najważniejszych z nich należy skorygowanie głowicy fotometrycznej luksomierza pod względem widmowym i przestrzennym. Bardzo często w praktyce pomiarowej zdarza się, że weryfikację parametrów oświetlenia elektrycznego przeprowadzają osoby niebędące specjalistami z zakresu miernictwa techniki świetlnej. To one też nierzadko podejmują decyzję o wyborze fotometru. W takim przypadku głównym kryterium przy zakupie luksomierza jest jego cena. Oferta dostępnych na rynku fotometrów jest bardzo szeroka. Ich ceny są bardzo zróżnicowane. Koszt tych najtańszych jest niższy od ceny wzorcowania, natomiast tych droższych sięga kilku tysięcy złotych.

Podczas weryfikacji natężenia oświetlenia, zgodnie z zapisami w Polskich Normach dotyczących oświetlenia wnętrz [7, 8], zaleca się, aby używane fotometry były wywzorcowane. Powszechnie uważa się, że gwarancją prawidłowości wskazań jest świadectwo wzorcowania luksomierza, najlepiej wydane przez akredytowane laboratorium wzorcujące. Warto jednak podkreślić, że do wzorcowania luksomierzy najczęściej używa się wzorców światłości w postaci lamp żarowych o temperaturze barwowej $T_c = 2856$ K. Obecnie do oświetlania wnętrz (pomijając gospodarstwa domowe), z uwagi na niską skuteczność świetlną, w zasadzie nie stosuje się już żarowych źródeł światła.

Ich miejsce zajęły bardziej wydajne źródła światła, do których zalicza się lampy wyładowcze oraz coraz bardziej popularne diody elektroluminescencyjne.

Rozkłady widmowe promieniowania emitowanego przez te lampy, z uwagi na inny sposób wytwarzania światła, różnią się od tego, przy którym przeprowadzono wzorcowanie luksomierza. Fakt ten będzie źródłem błędów pomiarowych, których wartości będą zależeć od stopnia dopasowania czułości widmowej fotoogniwa do krzywej V_λ .

Kolejnym czynnikiem wpływającym na dokładność pomiarów jest tzw. korekcja kosinusowa, której zadaniem jest eliminowanie błędów pomiarów, wynikających z promieniowania padającego pod kątem innym niż 0° . Ma to istotne znaczenie głównie w pomieszczeniach rozległych, w których światło na powierzchnię czynną fotoogniwa pada z różnych kierunków.

Zagadnienia dotyczące korekcji widmowej i przestrzennej głowic fotometrycznych luksomierzy są dobrze znane. Szczegółów na ten temat dostarcza bogata literatura

[9, 10, 11, 12, 13]. Niestety, w praktyce pomiarowej, podczas weryfikacji parametrów oświetlenia we wnętrzach, coraz częściej wykorzystywane są fotometry, w odniesieniu do których dopasowanie widmowe i przestrzenne pozostawiają wiele do życzenia.

2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Pomiarom poddano siedem różnych typów luksomierzy. Na potrzeby referatu poszczególnym fotometrom nadano numery od I do VII. W celu uniknięcia ewentualnego posądzenia o uprawianie reklamy/antyreklamy, celowo odstąpiono od podawania typów poszczególnych modeli badanych luksomierzy.

W tabelach 1 oraz 2 zestawiono dane techniczne deklarowane przez producentów fotometrów poddanych badaniom.

Luksomierze opisane w tabelach 1 i 2 charakteryzują się różnymi parametrami technicznymi. W specyfikacji producenci zamieścili między innymi informację odnośnie przedziału wskazań, zakresów pomiarowych i rozdzielczości wskazań. W danych technicznych luksomierzy oznaczonych numerami od V do VII, nie podano informacji dotyczących błędu niedopasowania widmowego f_1 oraz błędu niedopasowania kierunkowego f_2 , czyli parametrów, które są istotne w pomiarach fotometrycznych. Wobec powyższego, nasuwa się wniosek, że każdy z producentów przyjął własną zasadę podawania specyfikacji w instrukcjach obsługi fotometrów. Niejednolity sposób podawania parametrów technicznych może spowodować niepoprawną interpretację przez użytkownika wszystkich zamieszczonych danych.

W podanej specyfikacji należy również zwrócić uwagę na luksomierze oznaczone numerami od I do III, ponieważ zostały one zakwalifikowane do odpowiedniej klasy przyrządu zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej [14]. Podział luksomierzy na cztery klasy charakteryzuje ich dokładność.

Poniżej przedstawiono podziały luksomierzy na odpowiednie klasy:

- klasa L – fotometry najwyższej jakości stosowane w warunkach laboratoryjnych;
- klasa A – fotometry wysokiej jakości;
- klasa B – fotometry średniej jakości;
- klasa C – fotometry niskiej jakości.

W tabeli 3 zamieszczono dla każdej klasy wartości dotyczące największego dopuszczalnego błędu dla wybranych parametrów.

Zakres badań, który przeprowadzono w odniesieniu do siedmiu typów luksomierzy, obejmował:

- wzorcowanie fotometrów;
- zarejestrowanie wskazań luksomierzy dla wiązki świetlnej (emitowanej przez lampę żarową) padającej na głowice fotometryczną pod różnymi kątami ε ;
- zarejestrowanie wskazań luksomierzy przy oświetlaniu głowicy fotometrycznej źródłami światła o różnych rozkładach widmowych.

TABELA 1

Dane techniczne luksomierzy, które poddano badaniom – część 1

Parametry techniczne	Numer badanego luksomierza					
	I		II		III	
Przedział wskazań	(0÷300 000) lx		(0÷199 900) lx		(0÷1999) lx	
Zakresy pomiarowe oraz rozdzielczość (d)	30 lx 3000 lx 300 000 lx	d	200 lx 2000 lx 20 000 lx 200 000 lx	d	2 lx 20 lx 200 lx 2000 lx	d
		0,001 lx		0,1 lx		0,001 lx
		0,1 lx		1 lx		0,01 lx
		10 lx		10 lx		0,1 lx
Klasa dokładności	A wg CIE*		A wg CIE		B wg CIE	
Błąd niedopasowania widmowego f_1	$\leq 2\%$ wg CIE		$\leq 2\%$ wg CIE		$\leq 3\%$ wg CIE	
Błąd niedopasowania kierunkowego f_2	$\leq 1,5\%$ wg CIE		$\leq 1,5\%$ wg CIE		$\leq 3\%$ wg CIE	
Błąd całkowity	$\leq 2,5\%$ wg CIE		$\leq 2,5\%$ wg CIE		$\leq 3,5\%$ wg CIE	

* CIE – Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa

TABELA 2

Dane techniczne luksomierzy, które poddano badaniom – część 2

Parametry techniczne	Numer badanego luksomierza							
	IV		V		VI		VII	
Przedział wskazań	(0÷400 000) lx		(0÷20 000) lx		(0÷100 000) lx		(0÷20 000) lx	
Zakresy pomiarowe oraz rozdzielczość (d)	40 lx 400 lx 4000 lx 40000 lx 400000 lx	d	200 lx 2000 lx 20000 lx	d	2000 lx 20 000 lx 100 000 lx	d	20 lx 200 lx 2000 lx 20000 lx	d
		0,01 lx		1 lx		1 lx		0,01 lx
		0,1 lx		10 lx		10 lx		1 lx
		1 lx		100 lx		100 lx		10 lx
		10 lx						100 lx
Dokładność	dla E (lx) < 10,000 lx±(5% wartości wskazanej + 10 cyfr) dla E (lx) > 10,000 lx±(10% wartości wskazanej + 10 cyfr)		±(4% wartości wskazanej + 2 cyfry)		±(5% + 2 cyfry)		±(3% wartości wskazanej, + 0,5% zakresu)	
Błąd niedopasowania widmowego f_1	$f_1 \leq 6\%$		brak informacji		brak informacji		brak informacji	
Błąd niedopasowania kierunkowego f_2	$f_2 \leq 2\%$		brak informacji		brak informacji		brak informacji	
Błąd całkowity	brak informacji		brak informacji		brak informacji		brak informacji	

TABELA 3

Wartości graniczne wybranych błędów fotometrów w zależności od klasy

Parametr	Maksymalne wartości błędów dla klasy			
	klasa L	klasa A	klasa B	klasa C
błąd niedopasowania widmowego f_1	1,5%	3%	6%	9%
błąd niedopasowania kierunkowego f_2	–	1,5%	3%	6%
fotometry najwyższej jakości				
fotometry wysokiej jakości				
fotometry średniej jakości				
				fotometry niskiej jakości

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono błędy względne oraz błędy kosinusowe luksomierzy, a także współczynniki (wskaźniki) korekcji barwy.

Pomiary uzupełniono rejestracją krzywych rozkładów widmowych źródeł światła wykorzystanych podczas pomiarów eksperymentalnych.

3. METODYKA I SPOSÓB PRZEPROWADZENIA BADAŃ

3.1. Wzorcowanie luksomierzy

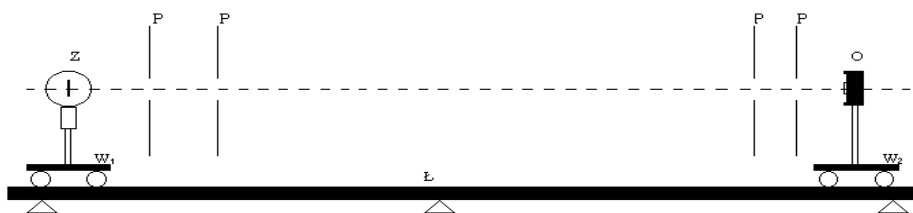
Wszystkie badania przeprowadzono w akredytowanym laboratorium wzorcującym nr AP 087, znajdującym się w Okręgowym Urzędzie Miar w Łodzi. Wzorcowanie luksomierzy wykonano zgodnie z opracowaną instrukcją wzorcowania. Stanowisko pomiarowe spełnia wymagania Polskiej Normy PN-91/E-04040/02 [2]. Metoda wzorcowania luksomierzy polega na bezpośrednim porównaniu wskazań wzorcowanego luksomierza z wartościami natężenia oświetlenia realizowanymi za pomocą wzorców światłości kierunkowej o temperaturze barwowej $T_c = 2856$ K. W normie PN-89/E-04040/00 [3] znajdują się dokładne wymagania, jakie powinny spełniać: wzorce światłości stosowane w pomiarach fotometrycznych, luksomierze odniesienia, elektryczne układy pomiarowe oraz elektryczne układy zasilające. Norma podaje również informację odnośnie monitorowania parametrów elektrycznych wzorców światłości wykorzystywanych podczas wykonywania pomiarów natężenia oświetlenia. W świadectwach wzorcowania wzorców światłości są określone parametry elektryczne, które należy zachować, aby móc poprawnie wykonać pomiary. Z tego względu stanowisko pomiarowe wyposażone jest w źródło prądu stałego służące do zasilania wzorców światłości wraz z woltomierzem oraz amperomierzem służącym do sprawdzania wielkości elektrycznych wzorców światłości. Wszystkie mierniki elektryczne znajdujące się na stanowisku pomiarowym zapewniają odpowiednie utrzymanie parametrów elektrycznych stosowanych wzorców światłości.

Wszystkie wzorce światłości stosowane w laboratorium zachowują spójność pomiarową w odniesieniu do państwowego wzorca jednostki miary światłości utrzymywanej w Głównym Urzędzie Miar. Pomiary natężenia oświetlenia były wykony-

wane w ciemni fotometrycznej na ławie fotometrycznej, która odpowiada wymaganiom normy PN-91/E-04040/02 [2]. Podczas wykonywania pomiarów wykorzystano luksomierz odniesienia, który służył jako dodatkowy wskaźnik kontroli parametrów elektrycznych wzorców światłości.

Pomiary natężenia oświetlenia były wykonane w ustabilizowanych warunkach środowiskowych tak, aby nie zachodziły nagle wahania temperaturowe. Warunki środowiskowe były monitorowane za pomocą termohigrometru.

Schemat stanowiska pomiarowego do wykonywania wzorcowania luksomierza przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do wzorcowania luksomierza:

L – ława fotometryczna; W_1 – wózek z uchwytem do mocowania wzorców światłości; W_2 – wózek pomiarowy z uchwytem do mocowania głowicy fotometrycznej wzorcowanego luksomierza; Z – wzorec światłości; O – głowica fotometryczna wzorcowanego luksomierza; P – przesłony fotometryczne

Przed przystąpieniem do wzorcowania należało przygotować stanowisko pomiarowe. W tym celu w uchwycie wózka do mocowania wzorca umocowano wzorec światłości. Przed założeniem przemyto bańkę wzorca światłości spirytusem etylowym w celu usunięcia zanieczyszczeń. Wzorec światłości ustawiono w odpowiedniej płaszczyźnie. Płaszczyzna żarnika wzorca światłości znajdowała się w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do osi optycznej ławy, a środek włókna wzorca światłości znajdował się na osi optycznej ławy. Wózek na którym znajdował się wzorec światłości ustawiono w punkcie zerowym ławy fotometrycznej. Po odpowiednim ustawieniu wzorca światłości na ławie fotometrycznej umieszczono na wózku wzorcowany luksomierz wraz z głowicą fotometryczną. Głowicę fotometryczną wzorcowanego luksomierza włożono w odpowiedni uchwyt, następnie ustawiono powierzchnię światłoczułą głowicy wzorcowanego luksomierza w płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do osi fotometrycznej ławy, a środek powierzchni światłoczułej na osi fotometrycznej ławy. Przesłony fotometryczne ustawiono tak, aby wiązka rozbieżna światła przechodząca przez otwór jednej przesłony padała całkowicie na powierzchnię następnej przesłony. Po ustawieniu stanowiska pomiarowego włączono zasilanie i ustawiono parametry elektryczne wzorca światłości zgodne z danymi zawartymi w świadectwie wzorcowania danego wzorca światłości. Po ustawieniu parametrów elektrycznych (przed rozpoczęciem wzorcowania) wygrzano wzorec światłości przez co najmniej 15 minut. Po jego ustabilizowaniu się przystąpiono do wzorcowania. Włączono wzorcowane luksomierze, a następnie sprawdzono ich wskazania przy zasłoniętym elemencie światłoczułym. W przypadku, gdy wzorcowane luksomierze nie pokazywały wartości zera, a była możliwość wykonania regulacji zera, wykonano jego regulację. W przypadku

jednego z wzorcowanych luksomierzy, przed przystąpieniem do wzorcowania przeprowadzono adjustację w punkcie pomiarowym 100 lx, która miała na celu przypisanie wartości odniesienia do wartości mierzonej. Po wykonaniu wyżej opisanych czynności przystąpiono do wzorcowania, czyli do wyznaczenia wartości natężenia oświetlenia zgodnie ze wzorem (1).

$$E = \frac{I\Omega_0}{d^2} \quad (1)$$

gdzie:

- E – natężenie oświetlenia w płaszczyźnie odbioru głowicy fotometrycznej luksomierz, lx;
- I – światłość kierunkowa wzorca światłości wyrażona w kandelach, cd;
- d – odległość pomiędzy wzorcem światłości a powierzchnią odbioru głowicy fotometrycznej luksomierza;
- Ω_0 – jednostkowy kąt bryłowy wyrażony w steradianach, 1 sr.

Po wykonaniu wzorcowania wszystkich badanych luksomierzy obliczono błędy względne oraz oszacowano niepewność pomiaru.

3.2. Wyznaczenie błędu kosinusowego dla ogniwa fotometrycznego luksomierza

Błędy odbiorników badanych luksomierzy wyznaczono w dwóch półpłaszczyznach, w przedziale kątowym $0^\circ \leq \varepsilon \leq 85^\circ$, z częstością co 5 stopni, dla jednej wartości kąta azymutowego. W tym celu, na ławie fotometrycznej ustawiono wzorec światłości o temperaturze barwowej 2856 K. Głowicę fotometryczną badanego luksomierza, zwaną dalej głowicą, umieszczono na ławie fotometrycznej na wózku zaopatrzonym w goniometr. Goniometr pozwolił ustawić głowicę pod określonym kątem w stosunku do osi optycznej ławy. Po włączeniu i ustabilizowaniu się parametrów elektrycznych wzorca światłości (zgodnie z świadectwem wzorcowania) ustawiono głowicę luksomierza pod kątem 0° w stosunku do osi optycznej. Głowicę ustawiono w wybranym punkcie zakresu pomiarowego (100 lx), po czy odczytano i zapisano odpowiadającą temu ustawieniu odległość r_0 . Następnie skręcano głowicę o kąt ε względem osi optycznej ławy, przesunięto wózek z luksomierzem do położenia, w którym wskazanie luksomierza odpowiadało wybranemu poprzednio punktowi 100 lx, następnie odczytano i zapisano odległość r_ε . Pomiarzy wykonano dla kątów z zakresu $0^\circ \leq \varepsilon \leq 85^\circ$.

3.3. Metodyka wyznaczania współczynników (wskaźników) korekcji widmowej

Wyznaczając współczynniki korekcji widmowej, wykorzystano metodę opisaną w zarządzeniu nr 32 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 20 marca 1995 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji sprawdzania luksomierzy.

W celu wyznaczenia współczynników (wskaźników) korekcji widmowej, na ławie fotometrycznej ustawiono wzorec światłości (iluminatem A) o temperaturze barwowej najbliższej $T_c = 2856$ K oraz wózek z uchwytem pozwalającym na jednoczesne zamocowanie ogniwa fotometrycznego badanego luksomierza oraz ogniwa fotometrycznego luksomierza odniesienia. Powierzchnie czynne ogniw fotometrycznych ustawiono w tej samej płaszczyźnie pionowej, prostopadłej do osi optycznej ławy. Za pomocą uchwyty na ławie fotometrycznej umieszczano kolejno w strumieniu wzorca światłości oraz pozostałych źródeł światła luksomierz odniesienia, a następnie luksomierz badany. W pierwszym kroku zmierzono natężenie oświetlenia E_{SW} na powierzchni ogniwa fotometrycznego badanego luksomierza oraz natężenie oświetlenia E_{WW} na powierzchni ogniwa fotometrycznego luksomierza odniesienia przy użyciu wzorca światłości (iluminatem A) o temperaturze barwowej najbliższej $T_c = 2856$ K. Następnie wzorec światłości zastąpiono źródłem światła, który nie był iluminatem A. Zmierzono natężenia oświetlenia E_{WB} na powierzchni ogniwa fotometrycznego luksomierza odniesienia oraz zmierzono natężenia oświetlenia E_{SB} na powierzchni ogniwa fotometrycznego badanego luksomierza.

Po zakończeniu badań dokonano metodą uproszczoną obliczeń współczynników (wskaźników) korekcji widmowej dla wszystkich użytych źródeł światła.

4. WYNIKI Z PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW LABORATORYJNYCH

4.1. Wyniki wzorcowania

Badane luksomierze, w zależności od typu, zostały wywzorcowane w zakresie pomiarowym ($5 \div 10\,000$) lx. Z wyników uzyskanych z wzorcowania policzono błąd względny zgodnie ze wzorem numer (2)

$$e_w = \frac{(X - X_p)}{X} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- e_w – błąd względny obliczony na podstawie świadectwa wzorcowania;
- X – wartość wskazana na wzorcowanym luksomierzu;
- X_p – wartość odniesienia z świadectwa wzorcowania;

W tabeli 4 podano błędy względne dla fotometrów oznaczonych numerami od I do III, obliczone zgodnie ze wzorem (2). Błędy względne zestawiono z błędami całkowitymi podanymi w tabeli 1.

W tabeli 5 podano błędy względne dla fotometrów oznaczonych numerami od IV do VII, obliczone zgodnie ze wzorem (2). Błędy względne zestawiono z wartościami dokładności obliczonymi zgodnie z tabelą 2.

TABELA 4

Błędy względne oraz całkowite luksomierzy, które poddano badaniom – część 1

Lp.	Punkt pomiarowy	Badane luksomierze					
		I		II		III	
		Błąd względny %	Błąd całkowity %	Błąd względny %	Błąd całkowity %	Błąd względny %	Błąd całkowity %
1	200 lx	0,3	2,5	0,5	2,5	1,0	3,5
2	2000 lx	0,4		1,4		1,0	
3	10 000 lx	0,5		0,9		–	

TABELA 5

Błędy względne oraz dokładności luksomierzy, które poddano badaniom – część 2

Lp.	Punkt pomiarowy	Badane luksomierze							
		IV		V		VI		VII	
		Błąd względny %	Dok.* %	Błąd względny %	Dok.* %	Błąd względny %	Dok.* %	Błąd względny %	Dok.* %
1	200 lx	2,0	5,5	4,5	5,0	1,5	6,0	4,5	8,0
2	2000 lx	1,8	5,5	6,0	5,0	1,6	6,0	4,9	8,0
3	10 000 lx	3,3	6,0	6,7	4,2	0,2	5,2	4,4	4,0

* Dok. – dokładność

W celu zobrazowania uzyskanych z wzorcowania błędów względnych, zostały one przedstawione na rysunku 2.

Dla każdego punktu pomiarowego oszacowano niepewność pomiaru na poziomie 2,3%.

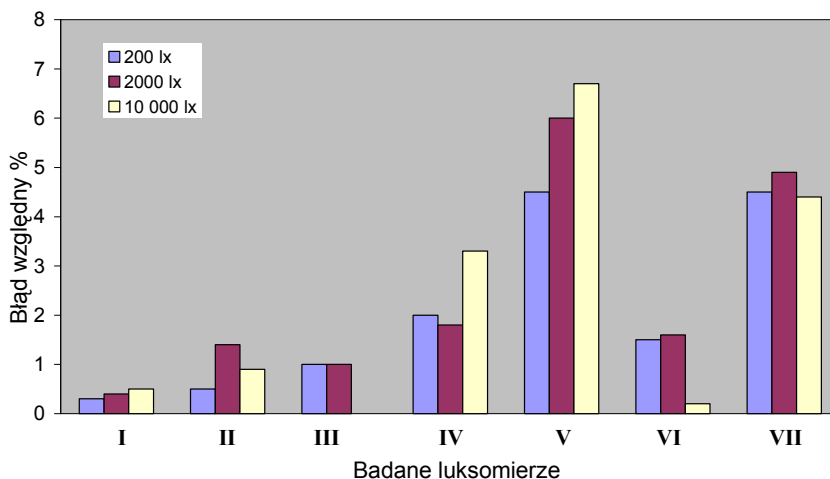
Analizując badane luksomierze pod kątem wyników uzyskanych z wzorcowania można zauważyć, że wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia wzrastają błędy pomiaru w przypadku luksomierzy oznaczonych numerami I oraz V.

Dla luksomierza oznaczonego numerem VI najmniejszy błąd pomiaru występuje przy największej wartości natężenia oświetlenia. Fotometry oznaczone numerami II oraz VII posiadają największy błąd pomiaru dla wartości natężenia oświetlenia 2000 lx; być może jest to spowodowane początkiem zakresu pomiarowego.

Porównując błędy względne z błędami całkowitymi dla luksomierzy oznaczonych numerami od I do III, można stwierdzić, iż są dużo mniejsze, niż deklarowane przez producenta błędy całkowite. Należy pamiętać, że w skład błędu całkowitego, oprócz błędu pomiaru, wchodzi innego rodzaju błędy, dlatego jeżeli błąd pomiaru podczas wzorcowania wyszedłby większy, niż błąd całkowity, mogło by to świadczyć o tym, że producent niepoprawnie go oszacował.

W tabeli 5 zestawiono błędy pomiaru oraz obliczone do każdego punktu pomiarowego dokładności deklarowane przez producenta. Analizując tabelę 5 można stwierdzić, iż tylko w przypadku luksomierza oznaczonego numerem V błędy pomiaru w punktach 2000 lx oraz 10 000 lx znajdują się poza deklarowaną dokładnością. Należy zauważyć, iż dokładność to, potocznie mówiąc, stopień zgodności między wynikiem

pomiaru a wartością odniesienia. Błąd pomiaru nie jest pojedynczą liczbą, a znajduje się w pewnym przedziale niepewności. Jeżeli w trakcie wykonywania wzorcowania błędy pomiaru są większe, niż deklarowana dokładność, wówczas możemy przypuszczać, że producent zawyżył deklarowaną dokładność przyrządu.



Rys. 2. Błędy względne badanych luksomierzy oznaczonych numerami od I do VII

4.2. Błędy kosinusowe

Jednym z wymagań stawianych luksomierzom jest spełnienie warunku, zgodnie z którym, odpowiedź luksomierza na padające promieniowanie będzie zgodna z funkcją kosinusa kąta padania promieniowania na powierzchnię czynną głowicy fotometrycznej luksomierza zgodnie ze wzorem (3):

$$E(\varepsilon) = E(0) \cdot \cos \varepsilon \quad (3)$$

gdzie:

$E(0)$ – jest odpowiedzią luksomierza oświetlanego promieniowaniem padającym na powierzchnię czynną pod kątem 0° .

W celu skorygowania odpowiedzi kosinusowej luksomierza stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne, z których najczęściej stosowanym jest umieszczenie przed odbiornikiem luksomierza elementu rozpraszającego światło. Skuteczność takiej korekcji jest różna w obrębie typów luksomierzy, których parametry metrologiczne są analizowane w tym artykule.

Względny błąd kosinusowy odbiornika fotometrycznego luksomierza wyznaczono na podstawie zależności (4)

$$f_2(\varepsilon, \varphi) = \frac{E(\varepsilon, \varphi)}{E(0, \varphi) \cdot \cos \varepsilon} - 1, \quad (4)$$

gdzie:

ε – kąt między osią wiązki świetlnej a prostą prostopadłą do powierzchni czynnej odbiornika;

φ – kąt azymutowy miał wartość stałą;

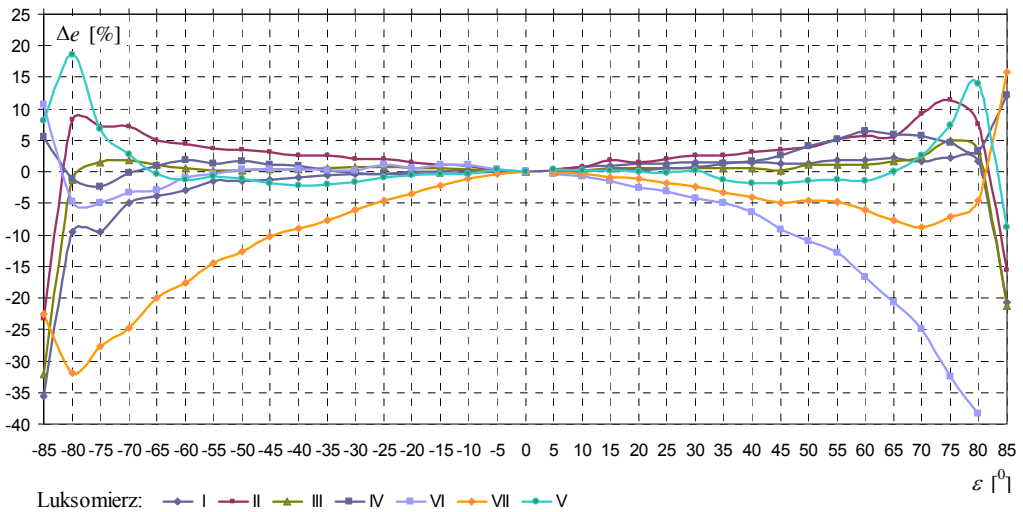
$E(\varepsilon, \varphi)$ – wartość natężenia oświetlenia przy oświetlaniu odbiornika pod kątem ε .

Błąd kosinusowy Δe luksomierza wyznaczono z zależności (5)

$$\Delta e = e_\varepsilon - e_0, \tag{5}$$

w zakresie $0^\circ \leq \varepsilon \leq 85^\circ$ w dwóch kierunkach obrotu głowicy fotometrycznej luksomierza: w kierunku zgodnym i przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara.

Wyniki przedstawiono w formie graficznej na rysunku 3. Na osi odciętych podano kąty, natomiast na osi rzędnych podano wartości błędów względnych głowicy fotometrycznych badanych luksomierzy.



Rys. 3. Błąd kosinusowy luksomierzy

Poprawna odpowiedź kosinusowa głowicy fotometrycznej luksomierza jest jedną z istotnych właściwości, warunkujących wykonanie pomiarów oświetlenia we właściwy sposób. Podczas wykonywania wzorcowania luksomierzy w warunkach laboratoryjnych, element światłoczuły luksomierza jest oświetlany pod kątem 0 stopni. Wzorcowanie nie daje więc informacji o charakterystyce odpowiedzi kątowej luksomierza. Podczas wykonywania pomiarów w różnego typu pomieszczeniach strumień świetlny pada na głowicę fotometryczną luksomierza pod różnymi kątami. Błąd systematyczny związany z nieprawidłową odpowiedzią kosinusową głowicy fotometrycznej luksomierza może w znaczny sposób wpływać na wyniki pomiarów wykonywanych w warunkach oświetlenia rozproszonego. W większości przypadków użytkownik przyrządu nie ma świadomości występowania w tym przypadku błędu statystycznego.

4.3. Wyznaczenie współczynników (wskaźników) korekcji widmowej

Dla każdego zastosowanego źródła światła obliczono współczynniki korekcji widmowej, korzystając z zależności (6).

$$K = \frac{E_{WB} \cdot E_{SW}}{E_{SB} \cdot E_{WW}} \quad (6)$$

gdzie:

E_{WW} – natężenie oświetlenia na powierzchni ogniwa fotometrycznego luksomierza odniesienia przy użyciu wzorca światłości (iluminantu A) o temperaturze barwowej najbliższej $T_c = 2856$ K;

E_{WB} – natężenie oświetlenia na powierzchni ogniwa fotometrycznego luksomierza odniesienia przy użyciu źródła światłości niebędącego iluminantem A;

E_{SW} – natężenie oświetlenia na powierzchni ogniwa fotometrycznego badanego luksomierza przy użyciu wzorca światłości (iluminantu A) o temperaturze barwowej najbliższej $T_c = 2856$ K;

E_{SB} – natężenie oświetlenia na powierzchni ogniwa fotometrycznego luksomierza odniesienia przy użyciu źródła światłości niebędącego iluminantem A.

Podczas wykonywania pomiarów został zachowany następujący warunek (7)

$$E_{WB} = E_{WW} \quad (7)$$

zatem współczynnik korekcji barwowej wyliczono z zależności (8)

$$K = \frac{E_{SW}}{E_{SB}} \quad (8)$$

W tabeli 6 podano wartości współczynników korekcji barwowej dla każdego zastosowanego w pomiarach źródła światła.

Zastosowanie podanych w tabeli 6 współczynników korekcji barwowej zmniejszyłoby błędy uzyskania niepoprawnej wartości natężenia oświetlenia. Dla użytkowników fotometrów najlepszą sytuacją jest, aby współczynniki korekcji barwowej miały wartość 1. W tabeli 6 można zauważyć, iż taka sytuacja występuje tylko dla luksomierzy oznaczonych numerami od I do III. Współczynniki korekcji barwowej są tutaj bliskie jedności, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu widmowym głowicy fotometrycznej. W przypadku luksomierza oznaczonego numerem IV, współczynniki korekcji widmowej różnią się dużo od oczekiwanej wartości, jaką jest 1. LED niebieski, dla luksomierzy oznaczonych numerami od IV do VII, okazał się źródłem światła, przy którym wartości współczynników korekcji barwowej najbardziej się między sobą różnią.

TABELA 6

Współczynniki korekcji barwowej dla badanych luksomierzy

Źródło światła	Badane luksomierze						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Wysokoprężna lampa sodowa	0,99	1,00	0,99	1,25	0,99	1,05	1,04
Wysokoprężna lampa rtęciowa	1,00	1,00	1,01	1,34	0,98	1,09	1,08
Lampa ksenonowa	1,00	1,01	1,01	0,99	1,00	0,85	0,85
Świetlówka liniowa (barwa ciepła)	0,99	0,99	0,99	1,17	1,01	0,90	0,90
Świetlówka liniowa (barwa chłodno-biała)	1,00	1,00	0,99	1,25	1,03	1,00	1,03
Świetlówka liniowa (barwa dzienna)	1,00	1,01	1,00	1,29	1,01	1,06	1,08
LED (barwa ciepła)	0,99	1,01	0,99	1,26	1,01	1,08	1,09
LED (barwa biała)	0,99	1,01	1,00	1,26	1,00	1,06	1,05
LED (barwa zimna)	1,00	1,01	1,01	1,14	1,03	0,90	0,91
LED niebieski	1,06	1,05	1,19	0,35	2,64	0,23	0,29
LED zielony	1,00	1,05	1,05	1,42	0,89	1,08	0,81
LED czerwony	0,99	0,94	0,95	0,79	1,30	0,93	1,63

4.4. Właściwości barwowe elektrycznych źródeł światła wykorzystanych do oświetlania głowicy luksomierzy

W odniesieniu do poszczególnych źródeł światła, którymi oświetlano powierzchnię światłoczułą luksomierza, przeprowadzono pomiary spektrometryczne w zakresie 380÷780 nm, z krokiem co 1 nm. Korzystając z zależności (9) wyznaczono względne wartości egzytancji promienistej, które posłużyły do obliczenia współrzędnych chromatycznych x , y , temperatury barwowej najbliższej T_{cn} oraz ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a (tabela 7).

$$S(\lambda) = \frac{100E(\lambda)}{E(560)} \quad (9)$$

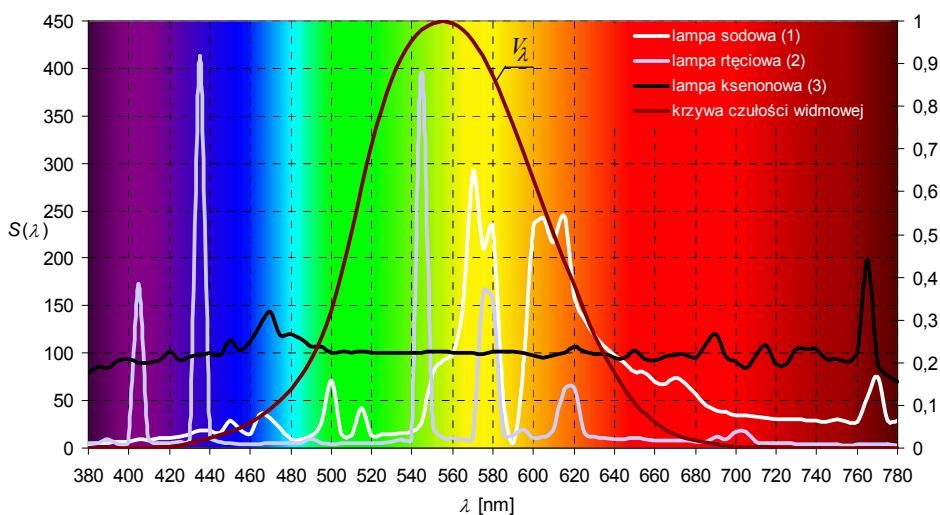
gdzie:

- $E(\lambda)$ – rozkład widmowy egzytancji promienistej;
- $E(560)$ – wartość egzytancji dla długości fali $\lambda = 560$ nm;
- $S(\lambda)$ – względny rozkład widmowy mocy egzytancji promienistej.

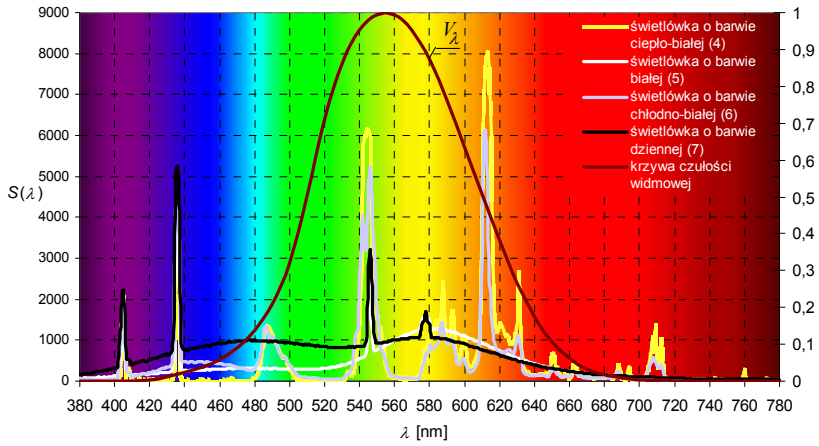
TABELA 7
Właściwości barwowe elektrycznych źródeł światła

Źródło światła	Symbol	x [-]	y [-]	T_{cn} [K]	R_a [-]
Lampa żarowa	(0)	0,4592	0,4088	2856	99,94
Wysokoprężna lampa sodowa	(1)	0,5047	0,4107	2178	56,04
Wysokoprężna lampa rtęciowa	(2)	0,3344	0,3520	5425	41,15
Lampa ksenonowa	(3)	0,3255	0,3257	5946	94,45
Świetłówka liniowa (barwa ciepła)	(4)	0,4297	0,3520	2657	84,75
Świetłówka liniowa (barwa biała)	(5)	0,3903	0,3718	3698	64,47
Świetłówka liniowa (barwa chłodno-biała)	(6)	0,3569	0,3451	4522	82,92
Świetłówka liniowa (barwa dzienna)	(7)	0,2996	0,3205	7373	79,04
LED (barwa ciepła)	(8)	0,4295	0,3996	3092	70,82
LED (barwa biała)	(9)	0,3746	0,3767	4163	66,34
LED (barwa zimna)	(10)	0,2977	0,3087	7721	80,21
LED niebieski	(11)	0,1320	0,0630	x*	x
LED zielony	(12)	0,1588	0,0560	x	x
LED czerwony	(13)	0,6953	0,3005	x	x

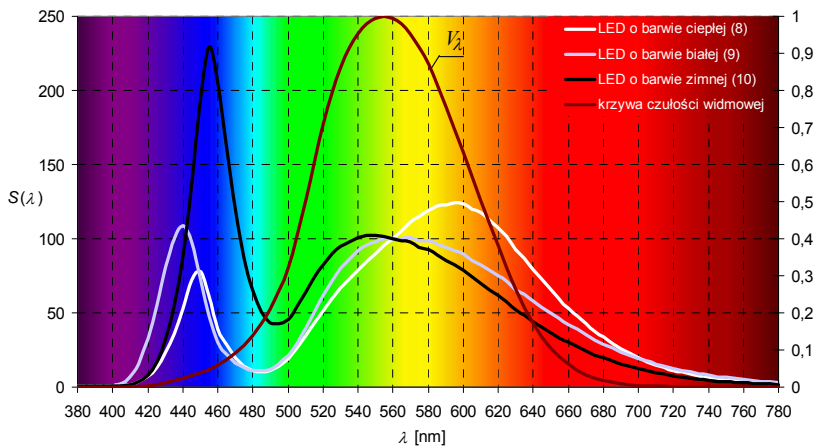
* x – nie ma zastosowania, odległość punktu chromatyczności od krzywej Plancka przekracza 0,04



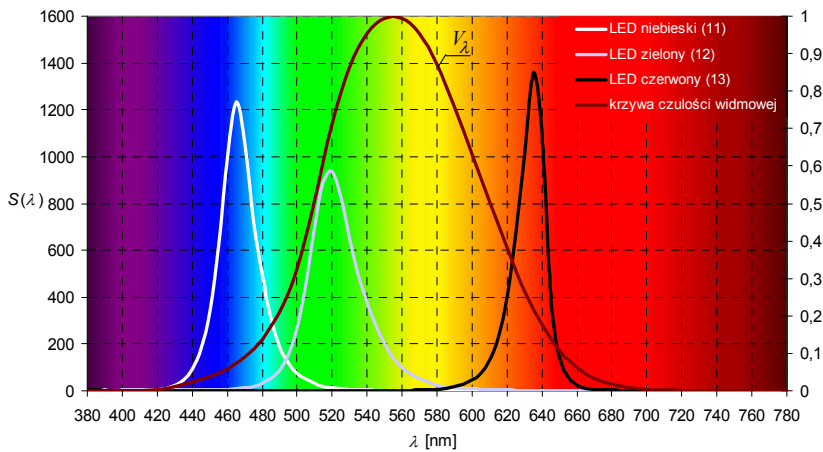
Rys. 4. Krzywe rozkładów widmowych wybranych lamp wyładowczych



Rys. 5. Krzywe rozkładów widmowych świetlówek liniowych



Rys. 6. Krzywe rozkładów widmowych źródeł LED



Rys. 7. Krzywe rozkładów widmowych barwnych źródeł LED

Krzywe względnych rozkładów egzytancji promienistej przedstawiono na rysunkach oznaczonych numerami od 4 do 7. Wobec faktu, że dla wybranych źródeł światła zarejestrowane wartości egzytancji dla długości fali $\lambda = 560$ nm są nieznaczące, w celu poprawienia czytelności rysunków, zmierzone $E(\lambda)$ pomnożono przez 100. Zabieg ten przeprowadzono w odniesieniu do lamp o symbolach 2 (rys. 4), 4, 6 (rys. 5) i 12 (rys. 7.). Dodatkowo na poszczególnych rysunkach naniesiono względną czułość widmową normalnego obserwatora CIE, do której powinny być dopasowane czułości odbiorników fotoelektrycznych.

5. WNIOSKI

W celu wyeliminowania błędów pomiarowych, spowodowanych niedostateczną korekcją widmową, wzorcowanie luksomierzy należałoby przeprowadzać przy zastosowaniu źródeł światła o rozkładach widmowych odpowiadającym mierzonym w praktyce promieniowaniom. Z uwagi jednak na dużą różnorodność stosowanych obecnie źródeł światła, przeprowadzenie takich pomiarów byłoby kłopotliwe. Warto też wziąć pod uwagę fakt, że bardzo często oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach jest wynikiem superpozycji różnych cząstkowych strumieni świetlnych pochodzących od różnych źródeł światła (opraw oświetleniowych, ścian, mebli itp.). A zatem wypadkowy rozkład widmowy strumienia świetlnego (padającego na powierzchnię światłoczułą luksomierza) będzie różnił się od rozkładu widmowego pojedynczego (jednego rodzaju) źródła światła.

Producenci w specyfikacjach technicznych podają błąd niedopasowania widmowego dużo niższy, niż jest on w rzeczywistości. Kierowanie się specyfikacją techniczną producenta przy wyborze luksomierza jest w takiej sytuacji niewystarczające, ponieważ niejednokrotnie wartości w nich podane są zaniżone lub podane orientacyjnie. Ponadto użytkownicy często wybierają luksomierze, których konstrukcja może być powodem nieprawidłowych wyników pomiarów, co w szczególności dotyczy luksomierzy, w których panel odczytowy i odbiornik fotometryczny jest w jednym elemencie. Takie rozwiązanie może spowodować częściowe zacielenie odbiornika przy próbie odczytania wartości natężenia oświetlenia. Jednym z istotnych kryteriów wyboru luksomierza jest jego cena. Użytkownicy powinni zdecydować o tym, na ile niska cena kompensuje niską jakość miernika. Laboratorium wzorcujące nie ma kompetencji do narzucania użytkownikom ograniczeń w stosowanych przez nich miernikach. Użytkownik ponosi odpowiedzialność za jakość wykonywanych przez siebie pomiarów i to on decyduje, czy jakość danego luksomierza jest wystarczająca do wykonania konkretnych badań.

W okresie, kiedy luksomierze podlegały prawnej kontroli metrologicznej (legalizacji), dopuszczano do użytkowania tylko fotometry spełniające wymagania odpowiednich przepisów. Podczas legalizacji sprawdzano charakterystyki metrologiczne, wyznaczano współczynniki korekcyjne dla najczęściej stosowanych źródeł światła, wyznaczano błąd kosinusowy oraz sprawdzano, czy konstrukcja, wykonanie, stan i oznaczenia sprawdzanego luksomierza odpowiadają wymaganiom przepisów o luksomierzach. Legalizacja była skutecznym narzędziem eliminującym mierniki posiadające

duże błędy, o niewłaściwych konstrukcjach lub z wadami jednostkowymi. Obecnie takich ograniczeń nie ma, a niepokojący jest fakt, że w ostatnich latach obserwuje się w laboratoriach wzorcujących dużą rozbieżność w jakości luksomierzy zgłaszanych do wzorcowania.

LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r.
2. PN-91/E-04040/02 Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary fotometryczne. Pomiar światłości.
3. PN-89/E-04040/00 Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary fotometryczne. Wymagania ogólne.
4. Pietrzykowski J.: Ocena niepewności pomiaru natężenia oświetlenia z użyciem temperaturowych źródeł światła o temperaturze barwowej najbliższej różnej od 2856 K, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 245, 2010, s. 87.
5. Pietrzykowski J.: Pomiary promieniowania optycznego, Technika Świetlna'09, Poradnik – Informator, tom 1.
6. Helbig E.: Podstawy fotometrii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1975.
7. PN-EN 12464-1:2004 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach.
8. PN-EN 12464-1:20012 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach.
9. Fryc I.: Korekcja widmowa detektorów stosowanych w głowicach fotometrycznych. Przegląd Elektrotechniczny, 7/1997, s. 191-195.
10. Fryc I.: Błędy korekcji widmowej wnoszone przez element rozpraszający głowicy fotometrycznej, powstające podczas pomiarów natężenia oświetlenia luksomierzem, III Krajowe Sympozjum Kolorymetryczne, Spała, 9-11 września 1998.
11. Fryc I.: Spectral correction of detector used in illuminance measurements. Proceedings of SPIE, Vol. 3820, pp. 343-348, Bellingham, Washington, 1999.
12. Fryc I.: Korekcja widmowa i przestrzenna fotometrów, Rozprawy Naukowe, Nr 71, Politechnika Białostocka, Białystok, 2000.
13. Czech E.: Model nowego konstrukcyjnego rozwiązania luksomierza, VI Krajowe Sympozjum Kolorymetryczne, Białystok-Białowieża, 4-6 czerwca 2003, s. 27-34.
14. Publikacja CIE 69-1987 Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters.

ANALYSIS OF THE CHOSEN ATTRIBUTES OF DIFFERENT TYPES OF LUXMETERS

Agnieszka BANASZAK
Przemysław TABAKA, Justyna WTORKIEWICZ

ABSTRACT *An illuminance meter is the basic and most frequently used measuring instrument in photometry. This instrument must meet a number of requirements e.g. a spectral and space correction of the photoelement in order to have the illuminance corresponding to the actual value. In the recent years, more and more photometers can be found on the market, which have generated a lot of attention because of their low price. Their individual cost is very often lower than the calibration price. On the grounds of the performed laboratory measurements, the chosen metrological attributes of commonly used luxmeters during the indoor verification of lighting parameters were analysed in the article. Instruments of high as well as low accuracy were tested. During the indoor lighting the light sources of different spectral concentration are used. Concerning this fact the individual luxmeters read-outs with light-sensitive surfaces lighted by the discharge lamp as well as LED sources were registered. Obtained results were compared with the values received during measurements carried out with the use of an electric lamp of the colour temperature $T_c = 2856$ K, i.e. a source, which radiation is used during the calibration of photometers. The relative and cosine errors as well as the colour correction coefficients (factors) were set down based on the carried out measurements. They were complemented with the registration of the spectral concentration locus of the light sources used during the experimental measurements.*

Keywords: *illuminance meter, cosine error the colour correction coefficient, spectral concentration, calibration, measurement error, light sources*